

В. В. Воропаев*, А. С. Скоробогатов, А. А. Барабашова

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

*sen_vvv@mail.ru

Научный руководитель — доц., д-р техн. наук В. П. Кузнецов

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФРИКЦИОННОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20X13

Исследовано влияние параметров фрикционной термомеханической обработки на формирование структуры и свойств поверхностного слоя стали марки 20X13. В работе представлен теоретический подход к управлению параметрами процесса. При обработке стали 20X13 получен упрочненный слой толщиной 1,7 мм, толщина слоя с микротвердостью 600 HV_{0,05} и более составила около 0,75 мм, микроструктура упрочненного слоя мартенситная и мартенситно-перлитная с дисперсными включениями карбидов. Определено, что скорость подачи инструмента оказывает наибольшее влияние на глубину упрочненного слоя.

Ключевые слова: фрикционная термомеханическая обработка, скорость вращения, подача, нормальная сила, микротвердость, микроструктура.

V. V. Voropaev, A. S. Skorobogatov, A. A. Barabashova

EFFECTS OF FRICTION STIR PROCESSING PARAMETERS ON THE FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF AISI 420 STEEL

The influence of the parameters of friction stir processing on the formation of the structure and properties of the surface layer of AISI 420 steel. The paper presents a theoretical approach to the management of process parameters. In the processing of AISI 420 steel obtained hardened layer thickness of 1.7 mm, the thickness of the layer with a hardness of 600 HV_{0,05} and more amounted to about 0.75 mm, the microstructure of the hardened layer of the martensitic and martensitic-pearlitic with dispersed inclusions of carbides. It is determined that the feed has the greatest impact on the depth of the hardened layer.

Key words: friction stir processing, rotation speed, tool feed, normal force, microhardness, microstructure.

Фрикционная термомеханическая обработка вращающимся инструментом (ФТМО) основана на управлении интенсивной локализованной пластической деформацией и высокоскоростным термическим воздействием. Для управления процессом ФТМО выделяются следующие технологические параметры: скорость вращения инструмента, подача и осевая сила [1]. ФТМО является частным случаем процесса обработки трением с перемешиванием (FSP). При FSP обычно используют инструмент с заплечником и наконечником [2], при использовании которого в поверхностном слое могут возникать различные дефекты. Для исключения внутренних дефектов при обработке трением с перемешиванием используют инструмент без наконечника с плоским торцом и фаской [3]. Кинематическая схема процесса ФТМО представлена на рис. 1.

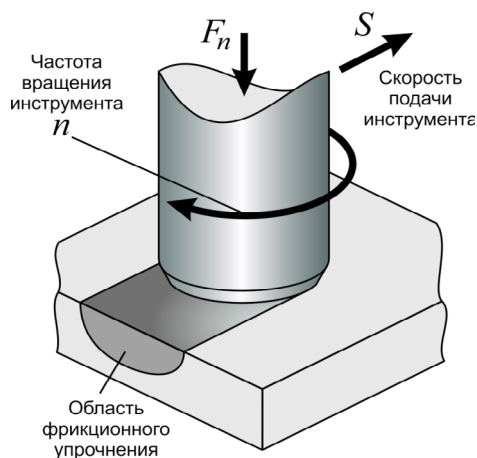


Рис. 1. Кинематическая схема фрикционной термомеханической обработки

Результаты исследований FSP при обработке стали AISI 420 (40X13) показаны в работе [4]. Установлено, что упрочнение поверхностного слоя достигается за счет формирования мартенситной структуры. Упрочнение поверхностного слоя хромистых сталей при ФТМО вращающимся инструментом с плоским торцом в условиях может быть осуществлено преимущественно за счет термического воздействия — закалки на воздухе.

В этом случае необходимым условием упрочнения является нагрев поверхностного слоя до температуры, превышающей значение критической точки $A_{c3} = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, и преобразование перлита в аустенит. Для достижения оптимальных результатов упрочнения стали 20X13, необходимо установить влияние параметров процесса ФТМО на структуру

и свойства поверхностного слоя. Выбранные параметры процесса должны обеспечить нагрев до температуры $T_n > A_{c3}$ и соответствующую выдержку $t_{\text{выд}}$ при данной температуре для передачи фрикционного тепла в поверхностный слой.

Таким образом, режимы обработки должны быть подобраны так, чтобы обеспечить преобразование $\alpha \rightarrow \gamma$ и при этом не допустить роста зерен аустенита.

Материалы и методы экспериментального исследования

Фрикционная термомеханическая обработка была проведена на фрезерном обрабатывающем центре МА-600/Okuma на образцах диаметром 100 мм из стали 20Х13 с исходной твердостью 187 НВ и микротвердостью после фрезерования 220–230 HV_{0,05}. ФТМО осуществлялась твердосплавным инструментом на основе карбида вольфрама фирмы Iskar с плоским торцом, диаметром рабочей части $d = 9$ мм и фаской $0,5 \times 45^\circ$. На основе планирования методом Тагучи для определения влияния параметров процесса на упрочнение поверхностного слоя было проведено 9 экспериментов (табл. 1).

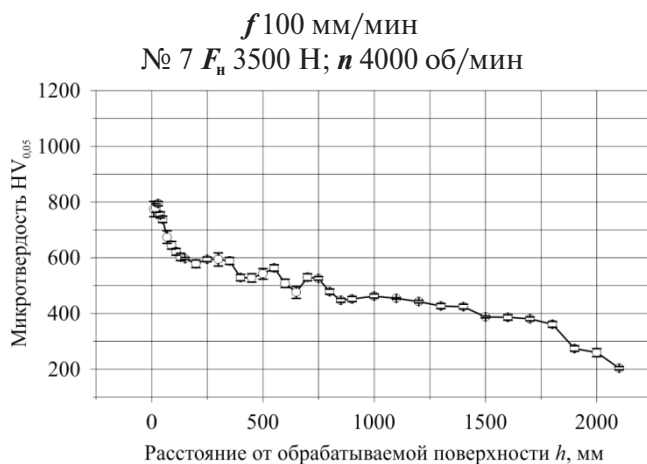
Таблица 1

Влияние параметров на упрочнение поверхностного слоя

Номер эксперимента	F_n , Н	f , мм/мин	n , об/мин
1	2500	100	3000
2	2500	150	3500
3	2500	200	4000
4	3000	100	3500
5	3000	150	4000
6	3000	200	3000
7	3500	100	4000
8	3500	150	3000
9	3500	200	3500

Для измерения микротвердости, по глубине поверхностного слоя после ФТМО были изготовлены шлифы с плоскостью под углом 19° к обработанной поверхности. Измерения микротвердости были выполнены в направлении центральной оси каждой дорожки на микротвердометре Leica VMHT методом Виккерса при нагрузке 50 кгс на индентор. Микротвердость HV_{0,05} измерялась по глубине с шагом приращения глубины, который был равен 10 мкм до глубины 50 мкм, 20 мкм — до глубины 150 мкм, 50 мкм — до глубины 900 мкм и 100 мкм — до исходной матрицы. Количество измерений на каждой глубине составило 5.

a



б

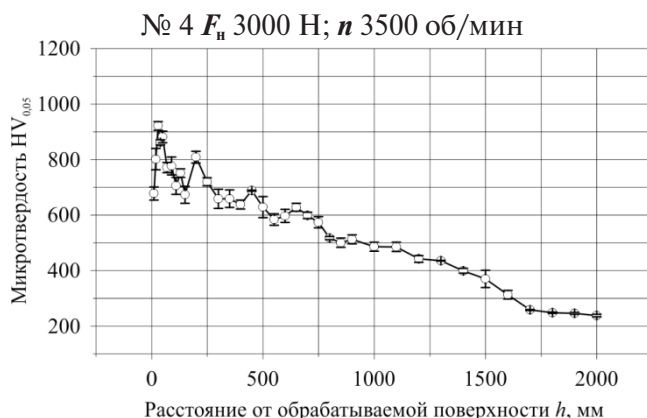


Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине:
a — образец № 7; *б* — образец № 4

Измерение микротвердости (рис. 2) показало, что наиболее глубокий упрочненный слой — около 1,7 мм — получился на образце № 4 с режимом обработки $F_n = 3000 \text{ Н}$; $f = 100 \text{ мм/мин}$; $n = 3500 \text{ об/мин}$ и № 7 с режимом обработки $F_n = 3500 \text{ Н}$; $f = 100 \text{ мм/мин}$; $n = 4000 \text{ об/мин}$. Оба режима имеют наименьшую подачу. Это свидетельствует о том, что подача является фактором, наиболее влияющим не только на упрочнение, но и на глубину упрочненного слоя. Также критерием упрочнения поверхностного слоя может быть его толщина с микротвердостью $600 \text{ HV}_{0,05}$ и более. Наилучший режим обработки по этому критерию использовался в эксперименте № 4, в котором толщина слоя с микротвердостью $600 \text{ HV}_{0,05}$ и более составила около 0,75 мм.

Исследование микроструктуры зоны обработки проводилось на оптическом микроскопе OLYMPUS с использованием программного обеспечения SIAMS-700 при увеличении $\times 50$ и $\times 500$. Анализ микроструктуры поверхностного слоя после ФТМО показал образование зоны параболической формы, в которой наблюдается модифицированная микроструктура (рис. 3). В этой зоне можно выделить три участка. На участке 1, находящемся вблизи обрабатываемой поверхности, наблюдается мартенситная структура с дисперсными включениями карбидов (рис. 4, а). Анализ микроструктуры на глубине 500 мкм показал, что формирование однородной мартенситной структуры обеспечивается только при подаче 100 мм/мин (рис. 4, б). На глубине 1000 мкм от поверхности при подаче 100 мм/мин формируется смешанная мартенситно-перлитная структура с дисперсными включениями карбидов (рис. 4, в). При подаче 150 и 200 мм/мин на глубине 1000 мкм не происходит изменения микроструктуры.

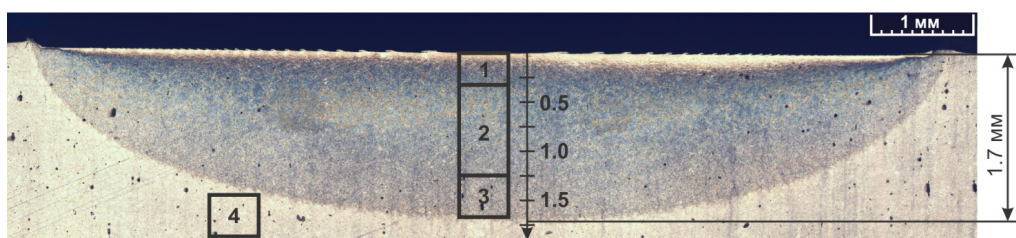


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя эксперимента № 4 при увеличении $\times 50$

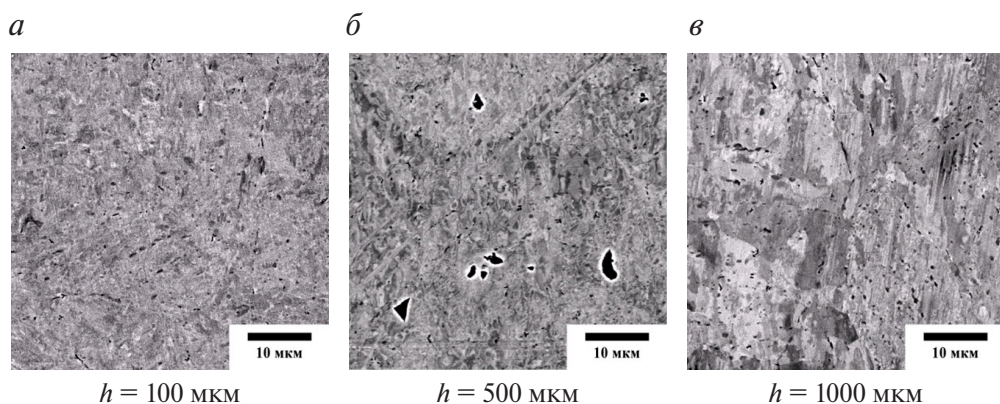


Рис. 4. Микроструктура упрочненного слоя при увеличении $\times 500$, полученного ФТМО на различном расстоянии от поверхности:

а–в — эксперимент № 4 ($F_n = 3000 \text{ Н}$; $f = 100 \text{ мм/мин}$; $n = 3500 \text{ об/мин}$)

Сопоставление результатов измерения микротвердости и анализа микроструктуры модифицированного и исходного материала, а также

изменения температуры в процессе ФТМО при различных сочетаниях параметров процесса позволяют сделать вывод о том, что время выдержки при максимальной температуре оказывает определяющее влияние на толщину упрочненного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Mishra R. S., Ma Z. Y. Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering Reports. V. 50. 2005. P. 1–78.
- 2 Review: friction stir welding tools/R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy // Science and Technology of Welding and Joining. 2011. V. 16, № 4. P. 325–342.
- 3 Review of tools for friction stir welding and processing / Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose and P. Wanjara // Canadian Metallurgical Quarterly. 2012. V. 51. P. 250–261.
- 4 Dodds S., Jones A. H., Cater S. Tribological enhancement of AISI 420 martensitic stainless steel through friction-stir processing // Wear. 2013. V. 302. P. 863–877.